УДК 62-781
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2019-4-13-18

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОСТРОЕНИЯ КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МАШИН

Дерюшев В. В., Коробецкий Д. И., Сорокина Д. Н.

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация
deryushevv@mail.ru
Korobadance@gmail.com
naukauni@mail.ru

Рассматривается применение теорий нечетких множеств и принятия решений к построению интегрального показателя безопасности в многокритериальном пространстве частных признаков на основе аксиоматически вводимой концепции достаточности. Предложены пути построения комплексного показателя безопасности при грузоподъемных работах с использованием компьютерных алгоритмов, которые обрабатывают большое количество информации для повышения достоверности получаемых оценок. Метод может быть адаптирован для конкретных объектов путем трансформации многокритериального пространства частных признаков, характеризующих безопасность эксплуатации объектов в реальных условиях.

Ключевые слова: безопасность, грузоподъемная машина, интегральный показатель, частные показатели безопасности, достаточность.

UDC 62-781
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2019-4-13-18

MATHEMATICAL MODEL OF CONSTRUCTION OF THE COMPLEX INDEX OF SAFE OPERATION OF HOISTING MACHINES

Deryushev V. V., Korobetskiy D. I., Sorokina D. N.

Don state technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

deryushevv@mail.ru
Korobadance@gmail.com
naukauni@mail.ru

Application of modern methods of the theory of fuzzy sets and the theory of decision-making to a problem of construction of an integral index of safety in multicriteria spatio-textual signs on the basis of axiomatically entered concept of sufficiency is considered. The ways of constructing a complex index of safety in the production of lifting machines using computer algorithms that allow a qualitatively new level to solve the problem of processing a large amount of information necessary to improve the reliability of the estimates. The proposed method can be adapted for specific objects by expanding or changing the multicriteria space of particular features that characterize the safety of operation of these objects in real conditions.

Keywords: safety, hoisting machine, integral indicator, private security metrics, sufficiency

Введение. Анализ безопасности эксплуатации грузоподъемных машин (ГПМ) показывает, что при существующей экономической ситуации и возрастающих требованиях к обеспечению работ применяемые в настоящее время меры в рассматриваемом направлении не дают удовлетворительных результатов. Одним из путей решения проблемы является применение автоматизированных систем, способных облегчить и упростить работу структур, обеспечивающих безопасность эксплуатации грузоподъемных машин. Необходимость создания подобных систем подчеркивалась коллегией Госгортехнадзора России. При этом разрабатываемые системы должны не только отображать состояние безопасности, но и способствовать выработке рекомендаций по повышению ее уровня на объектах. В качестве элемента такой системы авторами предлагается построить инфор-

мационно-аналитический алгоритм прогнозирования возможных аварийных ситуаций на предприятиях, эксплуатирующих грузоподъемные краны, подъемники и вышки.

Основные направления обеспечения безопасности эксплуатации грузоподъемных машин. Наиболее важными направлениями являются:

- надзор и контроль за состоянием техники;
- своевременный ремонт и обслуживание оборудования;
- обучение специалистов, работающих с грузоподъемными машинами, и контроль уровня их квалификации.

Анализ современного состояния решения задач в этих направлениях показывает наличие существенных недостатков [1, 2], в частности, отсутствие системности и разрозненное решение отдельных вопросов. Преимущество системного подхода к обеспечению безопасности эксплуатации ГПМ заключается в учете связей между указанными выше основными направлениями, в отличие от существующего положения дел, когда все усилия по решению проблемы прикладываются изолированно в рамках каждого направления без учета их взаимовлияния. Для реализации системного подхода необходимо разработать интегральный (комплексный) показатель, который можно будет использовать для прогнозирования безопасности эксплуатации конкретного объекта после определенного обучения с учетом изложенной ниже концепции достаточности.

Концепция достаточности при обеспечении безопасности объектов. Задачи повышения безопасности могут решаться классическими методами оптимизации известных критериев. Обычно для оценивания безопасности принимают показатель, формируемый на основе мероприятий надзора и контроля. Однако с помощью одиночного показателя затруднительно обосновать решения ввиду трудностей формулировки целевого функционала, учитывающего все факторы, влияющие на безопасность эксплуатации объекта. В этом случае задача становится многокритериальной с известным множеством решений, среди которых необходимо найти лучшее. Такие задачи решаются с использованием современной теории принятия решений [3].

Проблема повышения безопасности при наличии комплекса предъявляемых к объектам противоречивых требований, часть из которых не может быть представлена в виде числовых показателей, является достаточно сложной. Кроме того, в случае многокритериального оценивания безопасности, вопрос о показателях (их количестве, значимости, методах измерения и т. п.) является дискуссионным. Очевидно, что набор критериев должен охватывать все существенные стороны объектов. Чем больше показатель положительной стороны безопасности эксплуатации объекта и, соответственно, чем меньше показатель отрицательной стороны, тем лучше. Однако это положение не всегда справедливо, и может быть расширено за счет введения концепции достаточности [4]. Эта концепция предполагает существование пределов в показателях безопасности, превышение которых бессмысленно, так как не приводит к реальному результату, а в определенных случаях снижает безопасность ввиду наличия первоначально неучтенных факторов (неконтролируемых показателей).

С математической точки зрения понятие достаточности заключается в том, что при выполнении некоторых условий (условий достаточности), определяющих правильность утверждения P, оно становится заведомо верным. Следовательно, понятие достаточности в рассматриваемом случае включает в себя формулировку условий, при выполнении которых утверждение, что объект эксплуатируется безопасно, становится верным. Набор и формулировка условий достаточности зависит от специфики объекта, условий его эксплуатации и предъявляемых к нему требований [4]. Пусть по каждому из m показателей, характеризующих безопасность эксплуатации объекта, имеется заданное пороговое значение d_i. Тогда превышение этого значения оценками $x_{i\nu}$ и $x_{i\mu}$ для

анализируемых ν-го и μ-го объектов является необходимым и достаточным условием равнозначности с точки зрения требуемого уровня безопасности:

$$a_\nu \sim a_\mu \Leftrightarrow x_i^\nu \geq d_i, \qquad x_i^\mu \geq d_i, \qquad i = 1, \dots, m.$$

Данное условие представляет собой вариант математической формулировки концепции достаточности, а вводимая таким образом граница d_i в дальнейшем будет называться уровнем достаточности по каждому из показателей. Очевидно, что в практическом плане ключевым здесь является определение уровней достаточности (пороговых значений показателей) на основе качественного и количественного анализа безопасности эксплуатации объекта.

Построение интегрального показателя в критериальном пространстве. В случае многокритериального оценивания безопасности излишне большое число показателей снижает эффективность мониторинга, т. к. затрудняется комплексный (системный) анализ информации. В связи с этим целесообразно агрегирование показателей, т. е. построение одного интегрального показателя, адекватно передающего всю требуемую информацию об исходном наборе критериев [5]. Задача агрегирования решается путем построения иерархической структуры показателей. При этом на каждом уровне иерархии число частных показателей, как правило, не должно превышать 10. Формируемый интегральный показатель в этом случае будет достаточно гибким, чтобы иметь возможность включения (или исключения) дополнительного набора показателей без существенного изменения своей структуры [6]. Здесь целесообразно использование принципа обобщенного критерия, когда на множестве частных показателей задается метризованное мультипликативное отношение линейного порядка [5].

Пусть задано множество $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ объектов, уровень безопасности эксплуатации которых необходимо оценить в многокритериальном пространстве Re^m, характеризуемым множеством частных показателей $K = (k_1, k_2, \dots, k_m)$. Множество объектов A отображается в критериальном пространстве Re^m в виде множества точек, образующих матрицу оценок:

$$X = \left\| x_{ij} \right\|_{n,m},$$

где $x_{ij} = k_j(a_i)$ — оценка безопасности эксплуатации объекта a_i по шкале частного показателя k_j; n — число объектов в множестве A; m — число показателей (шкал оценок) в множестве K, на которых задается отношение метризованного мультипликативного линейного порядка [5].

Для учета введенной концепции достаточности и неопределенности ряда показателей произведем отображение исходных показателей $K = (k_1, k_2, \dots, k_m)$ в показатели $R = (r_1, r_2, \dots, r_m)$ с помощью формирования специальных функций принадлежности $y_{ij} = r_j(a_i)$:

$$y_{ij} = 0, \text{ если } x_{ij} \leq g_j;$$
$$y_{ij} = f(x_{ij}, g_j, d_j), \text{ если } g_j \leq x_{ij} \leq d_j;$$
$$y_{ij} = 1, \text{ если } x_{ij} \geq d_j.$$

При этом функция $f(x_{ij}, g_j, d_j)$ изменяется в пределах от 0 до 1.

Данное отображение позволяет ввести интегральный показатель, представляющий собой некоторую функцию Z от сформированных нечетких показателей r_j и размытого (в смысле Л. А. Заде [7]) отношения S на парах обучающих объектов, задаваемых как точки на оси z. Положение точек на оси z однозначно зависит от вектора коэффициентов $B = (b_1, \dots, b_m)$. Это позволяет определить функцию Z как линейную комбинацию оценок y_{ij} с вектором коэффициентов $B = (b_1, \dots, b_m)$, называемых коэффициентами свертки [8, 9]:

$$Z = \sum_{j=1}^{m} b_j r_j, \qquad z_i = \sum_{j=1}^{m} b_j y_{ij}, \qquad i = \overline{1, n}.$$

Компоненты вектора коэффициентов свертки подчиняются условию [8]:

$$b_j \geq 0, \sum_{j=1}^{m} b_j = 1.$$

Основная проблема состоит в построении отношения S и обоснованном определении вектора $B = (b_1, \ldots, b_m)$.

Методика определения коэффициентов свертки. Для определения компонент вектора $B = (b_1, \ldots, b_m)$ должно быть задано некоторое конечное множество P так называемых обучающих объектов, уровень безопасности эксплуатации которых объективно известен и может оцениваться числовым показателем. Это позволяет сформировать некую аппроксимирующую объективно существующую обучающую матрицу парных взаимосвязей между данными объектами [10]:

$$Q = \|q_{rk}\|_{p,p}.$$

Размер квадратной симметричной матрицы Q определяется количеством «p» рассматриваемых обучающих объектов из множества P, а ее элементами q_{rk} являются известные квадраты расстояний между r-м и k-м обучающими объектами на оси предпочтительности обеспечения безопасности.

Для построения отношения S на парах обучающих объектов определим квадрат расстояния между r-м и k-м обучающими объектами на оси показателя z по формуле:

$$s_{rk}(B) = (z_r - z_k)^2 = \left[\sum_{j=1}^{m} b_j \left(x_{rj} - x_{rj}\right)\right]^2.$$

Тогда наблюдаемая структура взаимосвязей между обучающими объектами на оси показателя z при фиксированном векторе B определяется квадратной симметричной матрицей:

$$S(B) = \left\|s_{rk}\right\|_{p,p}.$$

Соответствие структуры взаимосвязей между обучающими объектами, задаваемой матрицей Q, и наблюдаемой на оси показателей z структуры взаимосвязей, определяемых матрицей $S(B)$, оценивается с помощью функционала:

$$J(B) = \sum_{r=1}^{p-1} \sum_{k=r+1}^{p} \left[s_{rk}(B) - q_{rk}\right]^2.$$

Функция Z^*, определяемая вектором B^*, для которого величина функционала $J(B^*)$ минимальна, представляет собой интегральный (комплексный) показатель безопасности эксплуатации объекта. Решение задачи экстремизации функционала $J(B)$ относится к классу задач минимизации гладких функций на симплексе и подробно рассмотрено в [8, 9]. С учетом введенной концепции достаточности максимально возможное значение интегрального показателя безопасности равно единице. Это соответствует равенству единице всех, входящих в интегральный показатель, частных показателей безопасности, т. е. выполнению всех необходимых и достаточных условий, при которых эксплуатация объекта становится абсолютно безопасной. Степень близости интегрального показателя к единице показывает уровень комплексного выполнения требований безопасности по всем частным показателям. Это позволяет определять не только текущее состояние безопасности, но прогнозировать поведение объекта в случае изменения отдельных частных показателей, и управлять этими показателями [11, 12].

Пример построения иерархической структуры показателей безопасности эксплуатации ГПМ. При построении иерархической структуры к ординальным показателям верхнего уровня могут быть отнесены следующие:

- надзор и контроль за состоянием техники;
- ремонт и обслуживание ГПМ;
- обучение специалистов и контроль уровня знаний.

Для построения частных показателей безопасности на втором и последующих уровнях иерархии должны быть конкретизированы следующие критерии:

- надзор и контроль за техническим состоянием грузоподъемных кранов, подъемников и вышек;
- быстрый и своевременный ремонт приборов, обеспечивающих безопасность машин;
- обучение специалистов всех профилей, имеющих отношение к эксплуатации грузоподъемной техники.

Примерная структура показателей для трех уровней иерархии приведена на рис. 1.



Рис. 1. Иерархическая структура критериев для проведения мониторинга

Заключение. Разработанная модель построения комплексного показателя безопасности эксплуатации ГПМ позволяет определять уровень текущей безопасности анализируемых объектов в пределах от 0 (критическое состояние безопасности) до 1 (состояние полной или абсолютной безопасности). Модель является достаточно универсальной и может использоваться для оценивания безопасности других объектов при соответствующем изменении иерархической структуры показателей безопасности. Кроме того, модель позволяет автоматически адаптировать формируемый показатель к изменяющимся условиям путем изменения обучающего множества объектов и проводить постоянный мониторинг безопасности. Для этого необходимо осуществлять контроль изменяющихся в процессе эксплуатации частных показателей безопасности на нижних уровнях иерархической структуры.

Библиографический список

1. Короткий, А. А. Экспертиза промышленной безопасности и оценка риска для обоснования безопасности грузоподъемных машин, отработавших нормативный срок службы / А. А. Короткий, В. С. Котельников, В. Б. Маслов // Безопасность труда в промышленности. — 2013. — № 2. — С. 68–74.

2. Ефанов, Н. В. Требования по обеспечению безопасности при эксплуатации грузоподъемных машин / Н. В. Ефанов // Инновационная наука. — 2016. — № 2–3(14). — С. 74–75.

3. Кини, Р. Л. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Р. Л. Кини, Х. Райфа. — Москва : Радио и связь, 1981. — 560 с.

4. Дерюшев, В. В. Обобщенный показатель достаточности для оценивания технического состояния строительной и подъемно-транспортной техники / В. В. Дерюшев, Е. Г. Сидельникова // Научное обозрение. — 2013. — № 9. — С. 164–167.

5. Авен, П. О. Построение интегрального показателя в критериальном пространстве / П. О. Авен // Автоматика и телемеханика. — 1985. — № 4. — С. 87–91.

6. Дерюшев, В. В. Метод анализа иерархий разделяющихся признаков строительных и подъемно-транспортных машин / В. В. Дерюшев, Е. Г. Сидельникова, М. М. Зайцева // Строительство и архитектура : материалы междунар. науч.-практ. конф. — Ростов-на-Дону, 2015. — Т. 3. — С. 129–130.

7. Заде, Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенного решения / Л. А. Заде. — Москва : Мир, 1976. — 165 с.

8. Дерюшев, В. В. Структура и модель построения интегрального показателя для оценивания качества строительной и подъемно-транспортной техники / В. В. Дерюшев, Е. Г. Сидельникова // Научное обозрение. — 2013. — № 9. — С. 311–313.

9. Дерюшев, В. В. Анализ основных подходов к расчету комплексного показателя, учитывающего качество строительных и подъемно-транспортных машин / В. В. Дерюшев, Е. Г. Сидельникова // Строительство и архитектура : материалы междунар. науч.-практ. конф. — Ростов-на-Дону, 2015. — Т. 3. — С. 107–108.

10. Дерюшев, В. В. Алгоритм машинного обучения на основе анализа малых выборок / В. В. Дерюшев, А. А. Арташесян // Строительство и архитектура : материалы междунар. науч.-практ. конф. — Ростов-на-Дону, 2017. — С. 82–86.

11. Дерюшев, В. В. Прогнозирование требований к характеристикам транспортных агрегатов с учетом экономических ограничений / В. В. Дерюшев, Е. Г. Сидельникова // Научное обозрение. — 2014. — № 9–3. — С. 888–890.

12. Дерюшев, В. В.Исследование организации и проведения оценки уровня качества строительных машин и оборудования / В. В. Дерюшев, Е. Г. Сидельникова // Научное обозрение. — 2014. — № 11–3. — С. 778–781.

Об авторах:

Дерюшев Виктор Владимирович,
главный научный сотрудник Донского государственного технического университета (РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1), доктор технических наук, профессор,
deryushevv@mail.ru

Коробецкий Дмитрий Игоревич,
студент Донского государственного технического университета, (РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1),
Korobadance@gmail.com

Сорокина Дарья Николаевна,
старший преподаватель Донского государственного технического университета (РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1), кандидат технических наук,
naukauni@mail.ru